Acta Œcologica
Œcol. Plant., 1988, Vol. 9, n° 3, p. 245-269.

Production ligneuse et rétention d'éléments nutritifs par des taillis à courte rotation de peuplier « Rochester » : effet de la densité d'ensouchement

J. Ranger **, C. Barneoud *, C. Nys **
Avec la collaboration technique de :
F. Gastine *, P. Bonnaud **, D. Bouchard **
Louisette Gelhaye ** et D. Gelhaye **

(*) *Association Forêt-Cellulose (AFOCEL), Lyon (France).*
(**) *I.N.R.A., Centre de Recherches Forestières de Nancy, Station « Sols Microbiologie et Nutrition », Nancy, France*

RÉSUMÉ

Les dispositifs expérimentaux installés dans l'Est de la France dès les années 70 permettent de quantifier les besoins en éléments nutritifs de taillis à courte rotation de peupliers destinés à la production intensive de biomasse ligneuse.

Nous présentons ici les résultats d'une expérimentation installée sur un sol « d'apport alluvial » d'un affluent de la Saône dans l'Est de la France, dans laquelle trois densités initiales d'ensouchement (3 000, 6 000 et 9 000 souches. ha^{-1}) de peuplier « Rochester » sont testées.

Les taillis de la deuxième rotation ont été exploités alors que les tiges avaient 7 ans et les souches 14 ans. La production moyenne de 11.5 t de MS.ha^{-1}.an^{-1} est d'un niveau élevé bien qu'il semble qu'elle puisse être assez largement dépassée par de nouveaux clones.

L'immobilisation moyenne annuelle est de 30 kg de N; 5,5 kg de P; 20,1 kg de K; 90 kg de Ca et 3,5 kg de Mg.

Le prélèvement à partir du sol est quant à lui beaucoup plus élevé : 95 kg de N, 12 kg de P, 38 kg de K, 408 kg de Ca et 14 kg de Mg; une partie non négligeable est restituée par les litières et le pluviolessivage.

Il est exceptionnel qu'un sol forestier puisse fournir un tel flux d'éléments nutritifs.

L'effet de la densité d'ensouchement est au total assez limité, non significatif quant à la production et significatif pour seulement quelques éléments nutritifs (phosphore des feuilles, azote et magnésium du bois).

Pour une rotation de 7 ans, il ne semble pas utile d'établir des densités supérieures à 3 000 souches. ha^{-1}, ce qui diminue le coût d'installation et ce qui réduit les exportations liées aux bois de petites dimensions pour lesquels le rapport bois/écorce est défavorable.

MOTS CLÉS : Taillis à courte rotation, biomasse, minéralomasse, peuplier Rochester.

Acta Œcologica/Œcologia Plantarum, 0243-7651/88/03/245/25/$ 4.50/

ABSTRACT

The large experimental designs set up in the Eastern part of France at the beginning of the 70's have been used to quantify the nutrients incorporated in short rotation coppice grown to produce ligno-cellulosic biomass.

In this report, we present the results of an experiment established on a rich alluvial soil in a tributary valley of the river Saône. In this experiment, three stump densities of poplar (Rochester clone) have been tested (3000, 6000, 9000 stumps per ha).

The second rotation coppice was harvested when the trees were 7 years old and the stumps 14 years old.

The mean annual production of 11.5 mt of dry matter per ha and year is not amongst the highest values obtained now with new clones.

The mean annual immobilization of 30 kg of N, 5.5 kg of P, 20.1 kg of K, 90 kg of Ca and 3.5 kg of Mg is high.

The mean annual uptake is higher: 95 kg of N, 12 kg of P, 38 kg of K, 408 kg of Ca and 14 kg of Mg.

A large part of this uptake returns to the soil as litter and throughfall, but forest soils able to sustain this uptake are very rare.

The stand density effect is limited: no effect on production, only significant effect for the *P* uptake by leaves and *N* and Mg immobilization in wood.

For this rotation length, it does not seem necessary to plant more than 3000 stumps per ha: the installation cost is reduced, the production is not affected and the proportion of small diameter shoots with high nutrient contents is reduced.

KEY WORDS: Short rotation coppices, biomass, mineral contents, Rochester poplar.

I. INTRODUCTION

L'origine de la culture forestière à courte rotation n'est pas récente puisque les romains exploitaient déjà de cette manière les saules pour la vannerie (MAKKỌNEN, 1975). Cette pratique marginale en foresterie se maintient; le feuillardage des châtaigniers en Limousin (Centre France) est également un exemple historique de taillis à courte rotation.

La notion de production intensive de biomasse dans des taillis à courtes rotations (T.C.R.) ne date que des années 60 (MERRICK & BROWN, 1967) : le but de ces cultures est de produire de la matière première homogène, à des prix compétitifs, pour les industries de trituration (pâte et panneaux). La disponibilité de cette biomasse serait planifiée comme toute culture industrielle.

Cette culture nouvelle nécessite la sélection de matériel végétal rejetant de souches et ayant une forte croissance juvénile, des méthodes culturales proches de l'agriculture (agroforesterie) (NILSSON & ZSUFFA, 1983) et des recherches sur l'écologie des espèces utilisées. ANDERSON & ZSUFFA (1975), FUJIMORI (1981), MARQUESTAUT (1981), AFOCEL (1982) font le point sur les aspects techniques et économiques de ces plantations.

Dès les années 1970, des expériences ont été installées par l'AFOCEL pour tester les espèces, les clones, les paramètres sylvicoles, pour obtenir une production maximum et des produits adaptés aux nécessités du marché. L'aspect nutritionnel de ces plantations nouvelles doit être pris en considération. Peu de résultats sont disponibles sur des peuplements constitués. Les essences performantes, les rotations courtes, la récolte de la biomasse totale sont autant de paramètres qui concourrent à la divergence des bilans d'éléments minéraux établis dans les forêts classiques et dans les T.C.R. (Korsmo, 1983).

Nous présentons ici les résultats de production et rétention d'éléments minéraux dans des T.C.R. de peuplier « Rochester » de densité d'ensouchement variant de 3 000 à 9 000 souches. ha^{-1}. Quelques données sur le cycle des éléments seront présentées.

Le peuplier est en effet une des essences qui offre le plus de possibilités quant à la production de biomasse, étant donné sa faculté de bouturage et sa rapidité de croissance juvénile.

II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le programme « Production de biomasse » à des fins énergétiques de l'AFOCEL a débuté dès l'année 1970. Plusieurs dispositifs simples ont été installés dans l'Est de la France. Les résultats présentés ici concernent un essai implanté dans la vallée d'un petit affluent de la Saône, la Bèze. L'altitude est de 190 m, la pluviométrie de 700 mm par an dont 150 mm pour les 3 mois de croissance maximale du peuplier (juin, juillet, août).

La plantation a été faite sur un terrain agricole après un labour à 25 cm de profondeur, complété par une façon superficielle.

2.1. Le sol

Il est de type « sol d'apport alluvial à tendance brunifiée » (C.P.C.S., 1967) développé sur alluvions fluviatiles récentes. Le profil type montre la succession d'horizons suivante : Ao, Ap $(B_1)(B_2)$, C_1, C_2, C_3. Une cartographie très précise indique que la variabilité dans la distribution et l'épaisseur des « horizons » est caractéristique de la mise en place de ce genre de matériau (sédimentation lenticulaire); l'hétérogénéïté du dispositif réside dans l'apparition d'un banc de calcaire coquillier d'épaisseur variable mais toujours faible (constitué de gastéropodes terrestres de type limnée). Son apparition à moins de 70 cm de la surface du sol peut avoir des répercussions agronomiques significatives.

Ce sol limono-argileux de fond de vallée se caractérise au plan pédologique par un pH (H_2O) élevé, proche de 8, lié à la présence assez généralisée de calcaire actif. Le complexe absorbant est dans ces conditions saturé par le calcium ionique. Les variations verticales ne sont pas ou peu liées à des redistributions de type pédologique comme le montre clairement la distribution du calcaire total (tableau I).

Le diagnostic relatif aux essences forestières classiques montre d'une part une richesse suffisante en azote et magnésium (et calcium bien évidemment) ce qui est aussi pratiquement le cas pour le potassium (légèrement insuffisant dans l'horizon humifère) mais d'autre part une disponibilité limitée en phosphore assimilable (évalué par la méthode Joret-Hebert, 1955).

Plus précisemment pour la culture du peuplier, la valeur agronomique du sol peut se résumer ainsi :

— inconvénients :

• le pH pouvant être élevé dans les horizons de surface (~ 8) en liaison avec la présence de calcaire actif;

TABLEAU I. — *Caractéristique physico-chimiques du profil moyen du sol du dispositif de Drambon.*
The physico-chemical and chemical data for the mean soil profile of the Drambon experiment.

Horizon	Prof. (cm)	Densité appar.	MO (%)	N (%)	C/N	pH (H_2O)	Granulométrie (%) A	L	S	$CaCO_3$ total (%)	Éléments échangeables et CEC (meq/100 g) Ca	K	Mg	CEC	P_2O_5 ‰ (ass.)	Fer lib. (%)	Éléments totaux (%) Ca	Mg	K	Fe	P_2O_5
Ap	0-15	0,89	6,1	0,4	8,5	7,9	51,3	40,0	1,7	7,0	(55,6)	0,39	0,62	30,03	0,10	2,37	3,5	0,4	1,2	4,1	0,2
(B_1)	15-30	0,97	4,0	0,3	8,1	8,0	49,6	38,8	1,3	10,3	(54,9)	0,29	0,39	28,3	0,02	2,44	4,6	0,4	1,2	4,1	0,2
(B_2)	30-50	0,85	3,6	0,3	7,6	8,0	64,6	23,8	1,3	10,3	(60,5)	0,36	0,16	30,0	0,01	2,46	4,8	0,5	1,2	4,1	0,2
C_1	50-75	0,98	4,4	–	–	7,8	71,4	26,6	1,7	0,3	(47,9)	0,44	0,16	33,6	0,02	1,38	1,3	0,6	1,3	3,8	0,2
C_2	75-110	0,74	5,7	–	–	7,7	82,2	16,9	0,5	0,4	(52,0)	0,49	0,50	40,1	0,03	1,17	1,6	0,7	1,3	3,8	0,2
C_3	>110	1,07	–	–	–	8,2	–	–	–	51,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

- une disponibilité limite en phosphore assimilable dont GARBAYE (1980) a montré l'importance pour le peuplier;
- une disponibilité limite en eau pendant la fin de la période de végétation dans les zones où le calcaire coquillier apparaît à proximité de la surface;
- une dessication importante des horizons de surface.

— avantages :

- le sol est homogène avec en moyenne des horizons peu différenciés;
- une texture argilo-limoneuse en surface et argileuse en profondeur assurant une capacité élevée en eau disponible;
- un plancher de nappe phréatique vers – 1,50 m en été;
- une richesse chimique en moyenne élevée (sauf pour le phosphore).

Les réserves assimilables (sauf N), calculées à partir des analyses qualitatives, de l'épaisseur et de la densité apparente moyenne des horizons sont présentées au tableau II.

TABLEAU II. — *Les réserves moyennes en éléments nutritifs du sol de Drambon.*
The nutrient reserves of the Drambon soil.

Profondeur	N organique total	P assimilable	K échangeable	Ca échangeable	Mg échangeable	Mn échangeable
0-105 cm	8 600	240	1 500	100 000	600	10

2.2. LES PEUPLEMENTS

Le clone utilisé est le Rochester, hybride d'une mère Maximowiczii (baumier) et d'un père peuplier noir lui-même déjà hybride de deux peupliers noirs. Ce clone est maintenant abandonné, sa vigueur n'étant pas suffisante par rapport à d'autres clones du type interaméricain.

Sur une surface de 71 a, à l'écartement de 2,48 m entre lignes, une pépinière a été installée au printemps 1970, par plantation de boutures tous les 0,37 m en moyenne, soit 10 750 souches/ha^{-1}. Fin 1970, tout a été recépé et début 1971, une souche tous les x plants a été arrachée pour obtenir 3 densités d'ensouchement : 3 000, 6 000, 9 000 . ha^{-1}. le dispositif comportait 3 répétitions de chacune de ces densités, soit 9 combinaisons de 8 a environ réparties en carré latin sur le terrain. Un apport de 100-100-100 U de NPK est fait en plein en mai 1971.

Un nouveau recépage intervient début 1972 : le taillis proprement dit est constitué et aucune sélection n'est faite dans les rejets de souches. Une première exploitation a lieu au cours de l'hiver 1976-77, alors que les rejets ont 5 ans (les souches 7 ans).

Entre temps, une deuxième fertilisation identique à la première, a été faite en juin 1973, précédée d'un passage de girobroyeur (chardon abondant).

La première rotation de taillis

Les résultats de cette première récolte publiés par BONDUELLE (1977) sont consignés dans le tableau III. Rappelons brièvement les résultats les plus marquants.

Plus la densité est faible, plus le nombre de rejets par souches est élevé : 2 rejets vivants pour la densité 3 000, 1,2 pour la densité 6 000 et 1 seul pour la densité 9 000. Pour une même production, il vaut mieux une densité de souches plus faible, car moins elles sont serrées, plus elles produisent de rejets valables. D'autre part, plus la densité est faible, moins le nombre de rejets morts est élevé, avantage non négligeable pour l'utilisation du bois.

La distribution des circonférences montre que la concurrence a été différente selon la densité : (i) la différence de circonférence est ainsi plus grande entre la densité 9 000 et les deux autres; (ii) la répartition des circonférences est plus homogène pour la plus faible densité.

TABLEAU III. — *Résultats de la première récolte du taillis de Drambon (âge des souches : 14 ans; âge des rejets : 7 ans).*
Data from the first rotation harvest of the coppices (stumps 7 years, shoots 5 years).

Traitement (souches. ha^{-1})	Nombre de brins ∅ > 6 cm vivants . ha^{-1}	Nombre de brins morts	Circonf. moyenne arith. (cm) des tiges vivantes	Surface terrière des tiges vivantes ($m^2.ha^{-1}$)	Surface terrière des tiges mortes ($m^2.ha^{-1}$) (2)	Hauteur (m)
3 200	6 430	1 000	19,9	22,2	0,5	
(3 000) ([1])		13 %			2 %	moyenne
6 080	7 300	1 930	19,2	22,9	1,2	10,1
(6 000)		21 %			5 %	dominante
9 070	9 070	3 000	17,4	24,1	1,5	11,4
(9 000)		25 %			6 %	

Traitement (souches. ha^{-1})	Poids de toute la biomasse récoltée tiges vivantes et mortes + branches sans feuilles: Total . ha^{-1} (t)	Poids de toute la biomasse récoltée tiges vivantes et mortes + branches sans feuilles: par ha et par an de 72 à 76	Rendement MS $t.ha^{-1}.an^{-1}$	Volumes calculés par des tarifs propres à chaque densité de tiges vivantes ($m^3.ha^{-1}$): V. tiges complètes sans branches	V. tiges découpe > 3 cm	V. tiges découpe > 7 cm
3 200	129,2	25,9	11,4	116,9	111,6	57,2
(3 000) (1)						
6 080	131,2	26,2	11,6	120,9	113,9	40,3
(6 000)						
9 070	136,1	27,2	12,7	123,9	115,0	27,6
(9 000)						

([1]) Densité théorique à la plantation.
([2]) Circonférence des brins morts : entre 7 et 8 cm quelle que soit la densité.

Le rendement en matière sèche (MS) est peu différent pour les trois densités de plantation bien qu'une liaison positive semble exister avec la densité d'ensouchement.

La deuxième rotation de taillis

Une fois l'exploitation faite, les cimes et branches ont été enlevées en mai 1977, donc tardivement, ce qui a provoqué des troubles dans les rejets. Ce n'est qu'en juin 1978 qu'un passage de girobroyeur, suivi d'un passage de cover-crop eut lieu entre lignes.

Les souches ont bien rejeté dans l'ensemble, puisque fin 1978 la hauteur se situe entre 3 et 4 m. On notera qu'aucune fertilisation n'a été apportée au début de cette deuxième rotation, alors qu'habituellement 100 unités de N, P, K au minimum sont épandues en plein après exploitation.

Le tableau IV résume les principaux paramètres dendrométriques des peuplements âgés de 7 ans fin 1983 établis sur des souches de 14 ans.

Le nombre de souches vivantes a peu varié pour la densité 3 000 (3 200 à 2 900) mais il a beaucoup diminué pour la densité 6 000 (6 080 à 4 000) et surtout 9 000 (9 070 à 5 000).

TABLEAU IV. — *Résultats de la deuxième récolte du taillis de Drambon (âge des souches : 14 ans; âge de rejets : 7 ans).*

Data from the second rotation harvest of the coppices (stump 14 years, shoots 5 years).

Traitement souches. ha^{-1} à la plantation (fin 1983)	Bloc	Nombre de brins vivants par ha	Nombre de brins morts sur pied	Circonf. moyenne arith. (cm) des tiges fin 1983	Surface terrière des tiges vivantes ($m^2.ha^{-1}$)	Surface terrière des tiges mortes ($m^2.ha^{-1}$)	Hauteur (m)
3 000	1	5 000	800	25,1	27,9		
(2 900)	2	6 100	400	23,7	30,1		
	3	6 000	500	23,1	27,1		
	moy.	5 700	600	24,0	28,4	0,8	
						2,7 %	
6 000	1	6 500	1 100	23,6	30,9		moyenne
(4 000)	2	6 700	1 100	22,2	28,3		10,7
	3	9 200	400	22,5	39,7		Dominante
	moy.	7 500	900	22,7	32,9	1,0	12,7
						2,9 %	
9 000	1	5 900	900	22,6	26,7		
(5 000)	2	9 000	1 800	21,8	37,8		
	3	7 900	1 100	22,5	35,7		
	moy.	7 600	1 300	22,3	33,2		

Le nombre de brins vivants par souche diminue avec la densité passant de 2,0 (densité 3 000) à 1,9 et 1,5 : plus élevé qu'à la première rotation pour les deux densités fortes, il reste inchangé pour la densité faible. Il est à noter que le nombre de brins vivants par ha est le même pour les deux fortes densités.

L'écart entre circonférences moyennes suivant les densités est assez faible mais continu, cet écart ne s'accentuant presque pas depuis la 5[e] année de rejets (il représente tout de même une moyenne en poids de 3 kg/brin, soit 13 % en plus pour la faible densité par rapport aux deux autres).

La densité a une influence non négligeable sur la structure des peuplements; cette influence est plus complexe que celle observée après 5 années de rejets en première rotation comme semble l'indiquer la bi, voire la trimodalité des distributions des circonférences qui s'accentue de plus avec la densité d'ensouchement. La concurrence devient très importante; seules les tiges dominantes participent à la production actuelle, ceci étant d'autant plus net que la densité d'ensouchement est la plus forte.

2.3. MÉTHODOLOGIE

2.3.1. ÉVALUATION DES BIOMASSE ET MINÉRALOMASSE

Nous avons utilisé une méthodologie adaptée au double objectif d'évaluation de la biomasse et de la minéralomasse (RANGER, 1978, RANGER *et al.*, 1981; BOUCHON *et al.*, 1985). L'organigramme résumant les principales étapes est donné en annexe I.

Quelques points particuliers nécessitent un complément d'information.

— Les découpes 7, 4, 1 cm au fin bout sont étudiées dans la mesure où il s'agit, soit de normes internationales (découpe 7), soit de limite correspondant à des utilisations particulières (la découpe 4 correspondant à la limite d'utilisation pour la fabrication de panneaux).

— les tarifs à une entrée (C_{130}) sont construits suivant un modèle allométrique avec transformation logarithmique des données. Leur forme est la suivante : Log (MS ou MINERg) $= a + b \log (C_{130}$ mm).

La correction du biais lors du passage aux données arithmétiques est effectuée conformément à la méthode de BASKERVILLE (1972).

MS ou MINER $= 10^{((a + b \log C_{130}) + (\sigma^2/2))}$.

(σ) = variance résiduelle.

Ces tarifs ne doivent être utilisés que dans le domaine strict des dimensions d'arbres dans lequel ils ont été établis.

Les tarifs doivent être construits en cascade pour les houppiers :

- Création de tarifs Biomasse ou Minéralomasse d'une branche $= f$ (diamètre à 10 cm de l'insertion de la branche $= D_{10}$).
- Application de ce tarif à l'inventaire des branches sur l'arbre.
- Création de tarifs Biomasse ou Mineralomasse des branches totales $= f(C_{130})$.

Un test statistique de spécificité est réalisé à partir d'une analyse de covariance (DAGNELIE, 1973). Les coefficients des droites de régression spécifiques (pente, ordonnée à l'origine) sont comparés à ceux d'un tarif commun (traitements confondus). L'analyse de covariance permet d'effectuer un test de parallélisme (comparaison des pentes) et un test de superposition (comparaison des ordonnées à l'origine).

Cette cascade d'analyses statistiques, allant des données de terrain aux évaluations à l'hectare, est réalisée par un logiciel spécial (MANCIER, 1985) utilisant la programmathèque Amance (BACHACOU *et al.*, 1981).

2.3.2. *Analyses de sols*

Les échantillons de sol ont été analysés conformément aux méthodes décrites par DUCHAUFOUR (1970). Ce sont principalement l'analyse du carbone organique (méthode WALKLEY & BLACK, 1934), l'azote total (méthode KJELDAHL) les éléments échangeables à l'acétate d'ammonium à pH 7, la CEC par la méthode METSON, le phosphore assimilable par la méthode JORET-HEBERT (1955), le fer libre par la méthode D.E.B. (1950), le calcaire actif par la méthode DROUINEAU (1942), les éléments totaux par mise en solution par HF et dosage en spectrométrie d'absorption atomique.

2.3.3. *Les analyses de végétaux*

Les échantillons végétaux sont séchés à l'étuve à 65°C, broyés et homogénéisés. L'azote, après minéralisation de type Kjeldahl modifié (acide sulfurique + catalyseur K_2SO_4, Se) est déterminé par colorimétrie au bleu d'indophénol sur un auto-analyseur Technicon. La minéralisation en milieu perchlorique + eau oxygénée, permet la détermination de Ca, Mg et Mn par spectrométrie d'absorption atomique, de *K* par émission atomique et de *P* par colorimétrie du complexe phosphovanadomolybdique sur auto-analyseur Technicon.

III. RÉSULTATS

3.1. DONNÉES QUALITATIVES

Les résultats détaillés par compartiment pour chaque densité et pour les éléments majeurs (N, P, K, Ca, Mg, Mn) sont présentés dans le tableau V. Le classement des compartiments en fonction de leur teneur en éléments nutritifs et pour l'ensemble des éléments considérés est le suivant :

feuilles > branches > écorce du tronc > bois de tronc.

TABLEAU V. — *Concentration en bioéléments majeurs des principaux compartiments des peuplements de l'essai de Drambon en fonction de la densité d'ensouchement (résultats en g pour 100 g de M.S.).*

Variations in the nutrient concentrations in the main components of the Drambon stands related to stumps density (data in per 100 of DM).

	Drambon X ($d=3\,000$)						Drambon IV ($d=6\,000$)					
	N	P	K	Ca	Mg	Mn	N	P	K	Ca	Mg	Mn
Feuilles ($n=15$)	1,76	0,150	1,27	3,08	0,130	0,004	1,82	0,195	1,34	2,86	0,130	0,004
	(0,24)	(0,037)	(0,73)	(1,29)	(0,038)	(0,001)	(0,23)	(0,111)	(0,68)	(0,88)	(0,049)	(0,002)
Bourgeons	1,02	0,16	0,46	1,42	0,11	0,000 5	1,02	0,16	0,46	1,42	0,11	0,000 5
Bois de branches	0,67	0,10	0,27	1,50	0,06	0,001	0,61	0,08	0,26	1,57	0,05	0,001
vivantes ($n=15$)	(0,18)	(0,03)	(0,06)	(0,61)	(0,02)	(0,000 3)	(0,15)	(0,01)	(0,04)	(0,32)	(0,01)	(0,000 3)
Branches mortes	0,24	0,026	0,09	1,30	0,04	0,001	0,24	0,026	0,09	1,30	0,04	0,001
Tronc												
Bois												
Découpe (1-4)	0,16	0,038	0,07	0,20	0,02	0,000 4	0,11	0,023	0,08	0,19	0,020	0,001
	(0,05)	(0,010)	(0,03)	(0,03)	(0,005)	(0,000 0)	(0,02)	(0,007)	(0,01)	(0,04)	(0,005)	(0,000 1)
(4-7)	0,07	0,024	0,06	0,18	0,013	0,000 4	0,05	0,022	0,07	0,20	0,015	0,000 4
	(0,02)	(0,005)	(0,01)	(0,09)	(0,005)	(0,000 0)	(0,01)	(0,006)	(0,02)	(0,07)	(0,005)	(0,000 0)
(> 7)	0,07	0,020	0,09	0,18	0,015	0,000 4	0,03	0,012	0,09	0,19	0,013	0,000 4
	(0,02)	(0,006)	(0,02)	(0,02)	(0,005)	(0,000 0)	(0,02)	(0,004)	(0,03)	(0,08)	(0,005)	(0,000 0)
Écorce												
Découpe (1-4)	0,88	0,13	0,38	2,52	0,08	0,000 5	0,86	0,14	0,37	3,04	0,09	0,000 6
	(0,07)	(0,02)	(0,11)	(0,46)	(0,009)	(0,000 1)	(0,17)	(0,02)	(0,06)	(0,33)	(0,02)	(0,000 2)
(4-7)	0,67	0,11	0,39	2,68	0,08	0,002	0,72	0,11	0,40	2,91	0,09	0,002
	(0,10)	(0,03)	(0,11)	(0,37)	(0,01)	(0,001)	(0,17)	(0,08)	(0,12)	(0,28)	(0,01)	(0,001)
(> 7)	0,57	0,09	0,39	2,82	0,07	0,003	0,59	0,09	0,38	2,99	0,07	0,003
	(0,04)	(0,02)	(0,09)	(0,19)	(0,001)	(0,002)	(00,12)	(0,01)	(0,11)	(0,30)	(0,02)	(0,002)
Arbre mort												
Branches	0,36	0,02	0,07	1,41	0,03	0,014	0,36	0,02	0,07	1,41	0,03	0,014
Tronc	0,19	0,02	0,05	0,71	0,03	0,013	0,19	0,02	0,05	0,071	0,03	0,013

	Drambon I ($d=9\,000$)					
	N	P	K	Ca	Mg	Mn
Feuilles ($n=15$)	1,85	0,272	1,34	3,37	0,130	0,007
	(0,18)	(0,061)	(0,54)	(1,18)	(0,025)	(0,003)
Bourgeons	1,02	0,16	0,46	1,42	0,11	0,000 5
Bois de branches	0,63	0,11	0,29	1,62	0,05	0,000 5
vivantes ($n=15$)	(0,11)	(0,02)	(0,07)	(0,49)	(0,01)	(0,000 4)
Branches mortes	0,24	0,026	0,09	1,30	0,04	0,001
Tronc						
Bois						
Découpe (1-4)	0,16	0,031	0,102	0,17	0,02	0,003
	(0,02)	(0,006)	(0,031)	(0,035)	(0,00)	(0,001)
(4-7)	0,11	0,022	0,08	0,15	0,020	0,002
	(0,01)	(0,007)	(0,02)	(0,02)	(0,00)	(0,001)
(> 7)	0,11	0,018	0,11	0,18	0,02	0,003
	(0,05)	(0,004)	(0,04)	(0,03)	(0,005)	(0,000 5)
Écorce						
Découpe (1-4)	0,88	0,16	0,42	2,58	0,09	0,000 9
	(0,06)	(0,02)	(0,09)	(0,43)	(0,02)	(0,000 7)
(4-7)	0,78	0,13	0,45	2,83	0,09	0,002
	(0,12)	(0,03)	(0,12)	(0,21)	(0,02)	(0,001)
(> 7)	0,61	0,09	0,38	2,91	0,07	0,002
	(0,05)	(0,01)	(0,08)	(0,28)	(0,01)	(0,000 6)
Arbre mort						
Branches	0,36	0,02	0,07	1,41	0,03	0,014
Tronc	0,19	0,02	0,05	0,71	0,03	0,013

X = moyenne.
(X) = écart-type.

C'est un résultat classiquement obtenu qui justifie *a posteriori* la compartimentation effectuée.

Les données moyennes présentées pour les feuilles, en particulier, ne permettent pas de conclure quant à l'état nutritif de ces peuplements, selon les normes de l'analyse foliaire. Celles-ci résultent de normes parfaitement strictes, de dates et de méthodes de prélèvement (BONNEAU, 1978) qui ne sont pas respectées ici. L'interprétation directe des résultats du compartiment feuilles amènerait à la conclusion que ces peuplements sont carencés en N, P, K, voire Mg (BERNIER, 1984; BONNEAU, 1986). Les mesures de croissance montrent que celà ne saurait être le cas.

La stratification opérée dans le tronc montre que pour N, P, K et secondairement pour Mg, les teneurs décroissent pour les portions de tronc comprises entre ∅ 1 et ∅ 4 cm et ∅ 7 cm et plus de ∅ 7 cm.

On retrouve ce schéma dans lequel N, P, K seraient essentiellement les éléments des tissus jeunes alors que Ca serait surtout l'élément des tissus âgés. C'est une visualisation du phénomène physiologique d'utilisation des réserves par transfert interne d'éléments (ou cycle biochimique). Ce phénomène est en partie masqué pour les organes pérennes analysés globalement. L'évolution du rapport entre éléments N/Ca ou P/Ca ou K/Ca met en évidence la mobilité relative des éléments dans les transferts internes (FRISON, 1969; HANSEN & BAKER, 1979; SHELTON *et al.*, 1981). Ce cycle biochimique interne participe largement à l'autosuffisance des plantes pérennes (COLE & RAPP, 1980; MILLER, 1984).

Il est intéressant de comparer les exigences des différentes espèces (ou clones) entre elles et en particulier celles qui sont utilisées dans les taillis classiques et dans les T.C.R. (tableau VI). Cette comparaison est actuellement difficile car on ne dispose que de données partielles ne prenant pas en compte l'interaction âge × sol.

Les résultats du tableau montrent qu'en moyenne les tissus des compartiments comparables des « espèces » de T.C.R. sont plus concentrés que ceux des taillis classiques; les éléments les plus sensibles sont le phosphore et le potassium ainsi que le calcium. Les compartiments où celà est le plus net sont l'écorce de tronc et les branches.

Il n'est pas possible dans cette expérience de séparer les effets : espèces, âge, type de sol, dont on connaît l'importance : par exemple HANSEN et BAKER (1979) ont clairement montré l'effet de l'âge sur la composition chimique de plusieurs espèces dont le peuplier. L'effet type de sol existe, bien que souvent plus faible que le précédent (sauf pour le calcium); il agit sur la concentration des tissus en interaction avec la production (MILLIER *et al.*, 1985).

Dans l'expérience en question, les analyses statistiques des données permettent d'étudier l'effet du facteur densité d'ensouchement sur la teneur en bioéléments des différents compartiments des arbres. Celles-ci consistent en une analyse de la variance prenant en compte un ou plusieurs facteurs, avec ou sans interaction, suivie d'une analyse factorielle discriminante (AFD) permettant de visualiser la position des différentes populations dans le plan d'axes significatifs auxquels les variables initiales sont plus ou moins fortement corrélées.

Les résultats de l'analyse de variance sont consignés dans le tableau VII.

TABLEAU VI. — *Comparaison des teneurs en bioéléments de quelques espèces de taillis classiques et de taillis à courte rotation.*

Comparison of the nutrient concentrations in some components of the short and long rotation coppices.

	Bois de tronc					Écorce de tronc					Branches (Bois + Écorce)				
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
Taillis classique :															
Chêne : 30 ans sur sol brun acide réf. BOUCHON *et al.* (1985)	0,12	0,01	0,07	0,04	0,01	0,51	0,02	0,20	0,72	0,03	0,65	0,05	0,21	0,24	0,04
Bouleau : 30 ans sur sol brun acide réf. BOUCHON *et al.* (1985)	0,11	0,01	0,05	0,05	0,02	0,46	0,03	0,12	0,38	0,03	0,59	0,06	0,16	0,23	0,05
Chataignier : 25 ans sur sol lessivé dégradé réf. BOUCHON *et al.* (à paraître)	0,07	0,03	0,02	0,03	0,01	0,47	0,03	0,19	1,37	0,20	0,44	0,03	0,33	0,30	0,08
Taillis à courte rotation :															
Aulne (*Alnus incana*) : 5 ans, sur sol podzolique fertilisé réf. SAARSAMI & PALMGREN (1984)	0,41	0,05	0,12	0,12	0,03	1,56	0,20	0,47	0,63	0,10	1,08	0,10	0,40	0,39	0,10
Peuplier (deltoïdes) : 7 ans sur sol alluvial réf. SHELTON *et al.* (1982)	0,07	0,01	0,12	0,15	0,02	0,45	0,06	0,54	1,72	0,13	0,36	0,06	0,27	0,82	0,08
Platanus occidentalis : 3 ans sur sol alluvial fertilisé WOOD *et al.* (1977)	0,43	0,15	0,20	0,25	0,18	0,84	0,19	0,35	0,81	0,14	0,60	0,11	0,23	0,36	0,15
Peuplier « Fritzi Pauley » : 10 ans sur sol brun faiblement lessivé hydromorphe réf. RANGER *et al.* (1987)	0,05	0,01	0,07	0,10	0,02	0,29	0,06	0,37	1,96	0,10	0,37	0,07	0,27	1,61	0,07
PEUPLIER « Roechester » : 7 ans sur sol alluvial fertilisé réf. présente étude	0,07	0,02	0,07	0,17	0,01	0,67	0,11	0,42	2,85	0,08	0,56	0,09	0,25	1,41	0,05

TABLEAU VII. — *Analyse de variance multivariable uni- ou plurifacteurs. Concentrations en bioéléments majeurs des principaux compartiments des peupliers « Rochester » de l'expérience de Drambon.*
Multivariate analysis of variance with one or several factors of the nutrients concentrations of the main components of poplars in the Drambon experiment.

	N	P	K	Ca	Mg	Mn
Feuilles :						
Effet densité	NS	**	NS	NS	NS	**
Bois de branches :						
Effet densité	NS	**	NS	NS	NS	NS
Bois de tronc						
Effet densité	**	**	**	NS	**	**
Effet découpe (1)	**	**	**	NS	NS	NS
Écorce de tronc						
Effet densité	NS	**	NS	**	NS	NS
Effet découpe (1)	**	**	NS	**	*	**

(1) Découpe : ∅ > 7; 5 > ∅ > 7; 1 > ∅ > 4.

Les branches

• les feuilles : l'analyse de variance met en évidence deux variables significatives *P* et Mn qui séparent la densité la plus forte (9 000) des deux autres (les concentrations en *P* et Mn y sont les plus élevées).

• le rameau : le phosphore oppose significativement les densités.

Le tronc

3 densités d'ensouchement ont été comparées à 3 découpes ∅ > 7, 4 < ∅ < 7, 1 < ∅ < 4).

L'analyse de variance montre que les effets densité et découpe sont très forts, ce que traduit d'ailleurs l'AFD. L'axe 1 s'identifie à un effet découpe alors que l'axe 2 s'identifie plutôt à un effet densité (fig. 1). On arrive en fait à une séparation des 9 populations si on choisit des axes obliques et si on prend les effets relatifs.

C'est la portion de tronc 1 < ∅ < 4 qui se sépare le plus nettement des deux autres (*N* et *P* sont les variables initiales les plus corrélées à cet axe).

C'est la plus forte densité d'ensouchement qui s'isole (K, Mg, Mn, Ca et N interviennent dans la discrimination).

L'écorce

L'analyse de variance montre que toutes les variables participent à la discrimination. Ce que traduit nettement l'axe 1 de l'AFD. Le classement est le suivant : découpe 1-4 > découpe 4-7 > découpe 7 pour les variables N, P, et Mg; c'est l'inverse pour Mn (fig. 2).

Au total, l'effet compartiment est très net, l'effet densité d'ensouchement l'est moins. Cet effet densité est plus marqué pour les tissus jeunes (feuilles, découpe 1-4) mais il y a une certaine persistance de cet effet (bois de tronc). WOOD *et al.*, (1977), dans leur étude sur *Platanus occidentalis* n'avaient trouvé aucun effet de la densité sur la composition chimique de cette espèce.

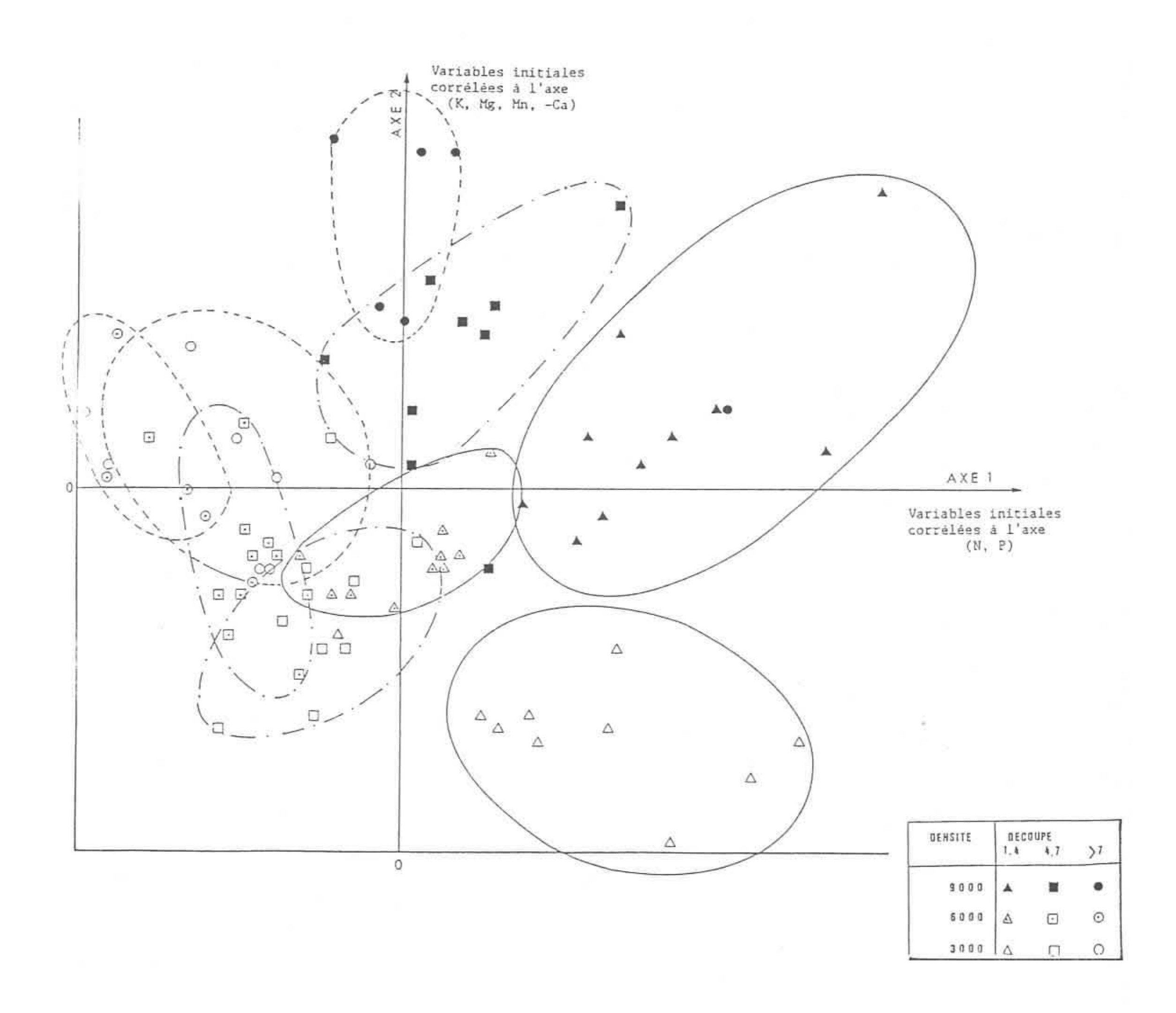
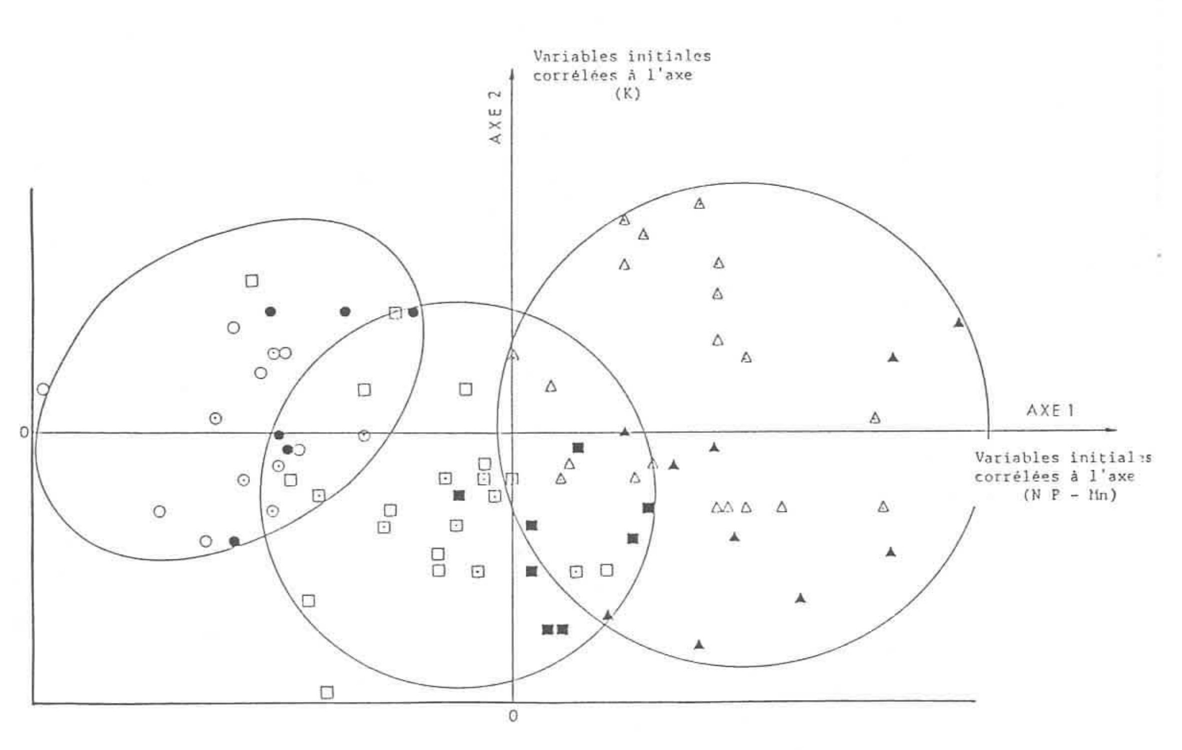


FIG. 1. — Bois de tronc : Analyse Factorielle Discriminante (AFD); facteur : densité × découpe; variables : éléments majeurs (N, P, K, Ca, Mg, Mn).

Fig. 1. — Trunk wood: Discriminant Factorial Analysis (factor: stump density × component; variables: nutrients (N, P, K, Ca, Mg, Mn).



DENSITE	DECOUPE 1.4	4.7	>7
9000	▲	■	●
6000	△	⊡	⊙
3000	△	□	○

FIG. 2. — Écorce de tronc Analyse Factorielle Discriminante (AFD); facteur : densité × découpe; variables : éléments majeurs (N, P, K, Ca, Mg, Mn).

Fig. 2. — Trunk bark: Discriminant Factorial Analysis (factor: stumps density × component; variables: nutrients (N, P, K, Ca, Mg, Mn).

3.2. Les tarifs

Plus de 300 tarifs particuliers ont été construits de façon à évaluer les biomasse et minéralomasse mais aussi à tester leur spécificité par traitement. Ils sont toujours prévisionnels ($R^2 > 0.8$).

Nous ne donnons ici que les tarifs généraux permettant l'évaluation de la biomasse et de la minéralomasse totales des brins de taillis de Rochester (tableau VIII).

Tableau VIII. — *Quelques exemples de tarifs logarithmiques de la forme : $\log MS_{kg}$ ou d'éléments$_g = a + b \log C130_{mm}$. Clone Rochester — biomasse aérienne ligneuse totale — (âge des tiges 7 ans-âge des souches 14 ans).*

Some examples of logarithmic equations to calculate the total biomass (without leaves) for the Rochester poplar. $\log DM_{(kg)}$ or Nutrient$_g = a + b \log_{(C130)}$ (shoots 7 years, stumps 14 years).

	Compar-timent	Ordonnée à l'origine (*a*)	Pente (*b*)	Variance résiduelle (σ)	Coefficient de corrélation (*r*)
	MS	2.543	−5,009	0,057	0,993
(tarif général toutes densités	N	2.225	−6,833	0,075	0,985
confondues)	P	2.410	−8,028	0,074	0,986
$n = 90$ pour MS	K	2.656	−8,075	0,109	0,975
$n = 30$ pour N P K Ca Mg	Ca	2.230	−6,352	0,045	0,994
	Mg	2.241	−7,800	0,065	0,987

Les résultats des tests de spécificité montrent que 40 % des tarifs construits sont spécifiques de la densité d'ensouchement : celà concerne d'ailleurs le plus souvent les organes entiers — feuilles, branches, tronc total, arbre total. Des résultats montrent clairement l'influence de la densité d'ensouchement sur la forme des tiges (toute autre condition étant fixée par ailleurs).

3.3. Biomasse et minéralomasse

Les résultats moyens annuels sont consignés dans le tableau IX. Des résultats plus détaillés sont donnés en annexe II.

3.3.1. *La production de matière sèche*

Dans ces peuplements (parcelles de 8 ares) elle est relativement élevée (12 t de $MS.ha^{-1}.an^{-1}$), si on la compare aux peuplements classiques traités en taillis pour lesquels il ne semble pas que l'on puisse dépasser 7 $t.ha^{-1}.an^{-1}$ pour des longueurs de rotation de l'ordre de 20 à 25 ans (cas de taillis de châtaignier), Bouchon *et al.* (1987) à paraître; elle ne représente cependant pas le maximum biologique qui peut être atteint en système intensif bien que se situant actuellement parmi les valeurs élevées en comparaison avec les données bibliographiques (Hansen & Baker, 1979; Geyer, 1981; Marquestaut, 1981).

Bien qu'il semble que les densités les plus fortes produisent sensiblement plus que la densité 3 000 souches par hectare, la variabilité observée pour la matière ligneuse aérienne totale (et qui se retrouve dans tous les compartiments) rend la différence entre les traitements non significative, quels que soient les compartiments.

En particulier aucune différence n'existe pour la découpe 7 entre les traitements; la moindre occupation de l'espace, très sensible sur la production les premières années ne l'est plus à 7 ans.

En conséquence, le surcoût d'installation pour des densités élevées (6 000 et 9 000) n'est pas nécessaire pour cette durée de rotation.

La comparaison avec les données de production aérienne ligneuse de la 1[re] rotation de taillis, compte tenu de la variabilité observée, montre que si la différence existe, elle reste trop limitée pour être interprétable (en première rotation la production moyenne était de 11.9 t de MS. ha^{-1}. an^{-1}; en seconde rotation, elle s'élève à la moyenne de 11.5 t de MS. ha^{-1}. an^{-1}.

3.3.2. *La minéralomasse*

Concernant la minéralomasse du peuplier Rochester de 7 ans, les résultats du tableau IX et de l'annexe II montrent que les distributions classiques sont conservées. On retrouve en particulier l'importance des petits compartiments de biomasse, telles les branches et les feuilles, dans la fixation de bioéléments. Par exemple :

– les feuilles représentent 6% de la biomasse et fixent de 20 à 30% des éléments;

– les branches représentent 15% de la biomasse aérienne et immobilisent de 20 à 30% d'éléments;

– par contre, le bois de tronc qui représente 60% de la biomasse n'immobilise que 10 à 25% des éléments;

– on note la très forte minéralisation de l'écorce du peuplier puisque les 12,5% de MS qu'elle représente immobilisent de 25 à 40% des éléments.

L'immobilisation moyenne annuelle par hectare est de l'ordre de 30 kg de N, 5 kg de P, 20 kg de K, 95 kg de Ca et 3,5 Kg de Mg.

Ces valeurs sont très élevées par rapport à ce que l'on obtient pour les peuplements forestiers de futaie ou même de taillis classique, pour lesquels les immobilisations moyennes annuelles sont toujours comprises entre 5 à 10 kg de N, 0,5 à 2 kg de P, et de 2 à 10 kg de K par hectare.

On retrouve ces immobilisations élevées en général dans les rotations courtes et spécifiquement avec le genre *Populus* (Bernier, 1984).

Une autre manière d'exprimer les besoins propres des peuplements à courte rotation qui résultent d'un effet espèce et de la longueur de la rotation (Korsmo, 1983; Raison & Crane, 1981) est de calculer le rendement des éléments nutritifs. En traitement de futaie en moyenne et longue rotation, qu'il s'agisse de feuillus ou de conifères, les besoins en éléments nutritifs majeurs (NPK) pour produire 1 t de MS ligneuse (biomasse aérienne totale) est d'environ 1 à 2,5 kg de N, de 0,1 à 0,3 kg de P et 0,5 à 3 kg de K. Pour les peuplements étudiés, tous traitements confondus, on arrive à 2,5 kg de N, 0,45 kg de P et 1,6 kg de K. Ces résultats situent ces peuplements parmi les valeurs les plus élevées pour les besoins en N, hors fourchette pour le P et parmi les valeurs moyennes pour le K.

TABLEAU IX. — *Production et immobilisation moyenne annuelle à Drambon (M.S. : matière sèche en t.ha^{-1}; minéralomasse kg.ha^{-1}).*

Mean annual production and immobilization for the Drambon stands (DM in mt.ha^{-1}, Nutrients in kg.ha^{-1}).

Densité		3 000						6 000						9 000					
		MS	N	P	K	Ca	Mg	MS	N	P	K	Ca	Mg	MS	N	P	K	Ca	Mg
Bois de branches		2,1	11,7	1,9	5,2	29,4	1,0	2,0	12,4	1,7	5,5	31,2	1,0	2,1	12,7	2,2	5,6	32,0	1,1
Découpe 7	Écorce	0,76	4,6	0,8	3,4	21,3	0,5	0,69	4,1	0,7	2,9	19,7	0,5	0,81	4,5	0,7	3,2	21,4	0,5
	Bois	4,40	2,7	0,7	3,8	6,9	0,6	4,00	0,7	0,6	3,4	6,1	0,6	4,40	4,2	0,7	3,8	6,8	0,6
	Total	5,12	7,0	1,5	7,3	28,1	1,1	4,65	6,3	1,2	6,3	25,8	1,0	5,20	6,8	1,4	7,1	28,2	1,1
Découpe 4	Écorce	1,29	8,2	1,3	5,4	36,5	0,9	1,31	9,2	1,4	5,8	38,5	1,1	1,41	9,4	1,5	6,0	39,5	1,1
	Bois	6,70	4,3	1,2	5,2	11,2	0,9	6,90	2,1	1,3	5,5	11,7	0,8	7,13	7,0	1,3	5,7	11,4	1,4
	Total	8,00	12,6	2,5	10,8	47,7	1,8	8,22	10,8	2,7	11,4	50,3	1,9	8,53	16,9	2,8	11,9	50,1	2,5
Tronc total	Écorce	1,53	10,3	1,6	6,4	43,7	1,1	1,60	11,6	1,9	7,2	49,2	1,4	1,73	12,3	1,9	7,3	47,5	1,4
	Bois	7,52	5,2	1,4	5,6	12,5	0,9	7,74	3,2	1,6	6,4	13,6	1,0	8,17	8,5	1,6	7,5	12,5	1,6
	Total	9,06	15,5	3,0	12,5	56,1	2,1	9,50	14,8	3,5	13,9	62,9	2,3	9,91	20,9	3,5	14,1	59,9	2,9
Arbre ligneux vivant		11,19	28,1	4,9	17,8	87,9	3,2	11,53	27,0	5,5	18,8	93,8	3,3	11,92	32,5	5,5	20,1	89,2	3,9
Arbre ligneux (vivant + mort)		11,60	29,1	4,9	18,0	91,8	3,3	12,20	28,5	5,6	19,2	99,6	3,5	12,60	34,0	5,7	20,5	95,4	4,1

M.S. : Matière sèche en t.ha^{-1}. Minéralomasse : en kg.ha^{-1}.

3.3.3. *Influence de la densité d'ensouchement*

L'analyse de variance montre que son influence est limitée.

Aucune différence significative n'apparaît en matière sèche. Les éléments discriminants sont le phosphore des feuilles, l'azote du bois et secondairement le magnésium du bois. Ces éléments discriminaient déjà l'effet de la densité au plan qualitatif.

L'analyse factorielle discriminante (AFD) permet de préciser les résultats :

— quand l'analyse de variance est significative les représentations des différentes répétitions sont toujours très groupées dans le plan des axes significatifs : cela signifie que le poids du paramètre « composition chimique » est important puisqu'aucune différence significative n'apparaît en matière sèche entre ces mêmes traitements;

— on observe des différences significatives entre les densités d'ensouchement pour les découpes partielles (bois) et non pour les compartiments totaux. Ce sont les densités extrêmes qui s'opposent pour des valeurs de minéralomasse : la plus basse pour la faible densité et la plus haute pour la plus forte densité. La dimension des produits intervient de manière plus nette qu'en biomasse.

3.4. ÉVALUATION DU PRÉLÈVEMENT DE CE TAILLIS, CONSÉQUENCES SUR L'ÉQUILIBRE DE LA FERTILITÉ MINÉRALE DU SOL

Nous nous proposons d'une part d'évaluer le prélèvement moyen annuel de telles cultures et d'autre part d'apporter quelques réflexions sur l'équilibre écologique de ces taillis.

Le prélèvement annuel à partir des réserves du sol d'une culture forestière est défini dans un modèle à compartiment par la formule suivante (ULRICH, 1973; RANGER & BONNEAU, 1984) :

PRÉLÈVEMENT = IMMOBILISATION + RESTITUTIONS

— *L'immobilisation* se défit comme la masse d'éléments retenue définitivement dans l'accroissement annuel (transferts internes déduits).

Compte tenu de l'évolution de la surface terrière avec l'âge du peuplement, il apparaît qu'à 7 ans l'accroissement courant n'est plus maximal; comme d'autre part, la masse foliaire est vite stabilisée (vers 2-3 ans) nous considèrerons qu'il vaut mieux raisonner sur le prélèvement moyen annuel, calculé à partir de l'immobilisation moyenne annuelle.

D'après le tableau IX, et en moyenne pour les 3 densités, l'incrément moyen annuel de biomasse est de 11.6 $t.ha^{-1}.an^{-1}$.

Les restitutions

• Les litières ont été ramassées au sol après la chute totale des feuilles des arbres en décembre. Ceci est possible car leur turnover sur ce site est très rapide et la litière foliaire se décompose pratiquement totalement dans l'année. La litière annuelle de bois morts est évaluée par leur masse ramassée au sol en fin de 7e année (rapportée à l'année).

Cette méthode ne prend pas en compte les chutes permanentes de litière en cours de la saison de végétation et qui ne sont cependant pas négligeables. BERNIER (1984) les évalue à environ 30% de la litière récoltée en fin de saison.

Aucune différence significative n'existe entre les traitements. Les résultats moyens sont présentés au tableau X. L'ordre de grandeur appartient à la fourchette

TABLEAU X. — *Restitution annuelle d'éléments par les litières : moyenne des trois densités d'ensouchement (données en* $kg.ha^{-1}.an^{-1}$*).*

Annual litter-fall and its nutrient content: mean results for the three stump densities (data in $kg.ha^{-1}.an^{-1}$).

		MS	N	P	K	Ca	Mg
Litière mesurée en fin de période de végétation	1	4 150	41,3	3,7	5,6	178,0	4,2
Litière résiduelle (bois)	2	250	2,5	0,2	0,3	10,7	0,3
Restitution au cours de l'année (évaluées à 30 % de 1)	3	1 250	12,4	1,1	1,7	53,4	1,4
TOTAL (1+2+3)		5 650	56,2	5,0	7,6	242,2	5,8

définie par BERNIER (1984) et est comparable à la valeur moyenne de 5,5 $t.ha^{-1}.an^{-1}$ obtenue par COLE & RAPP (1981) pour l'ensemble des peuplements étudiés dans le cadre du Programme Biologique International.

Cette litière est notablement appauvrie en N, P, K, Mg par rapport aux feuilles avant l'abscission; elle s'enrichit par contre en calcium.

Compte tenu du laps de temps entre l'évaluation de la minéralomasse foliaire et de celle des litières, les phénomènes de pluviolessivage, de transfert vers les parties perennes et de lessivage des éléments des litières, concourrent à expliquer la composition de cette litière.

• Le pluviolessivage total a été évalué d'après les données de COLE & RAPP (1981) et COLE (1986). Les restitutions par les litières représentent 17, 15, 59, 29 et 40 % des restitutions totales pour N, P, K, Ca et Mg respectivement.

L'estimation du pluviolessivage annuel dans ces peuplements est respectivement pour N, P, K, Ca et Mg de 9,0; 1,7; 12; 75 et 4,5 kg par ha.

L'estimation du *prélèvement moyen annuel* par hectare (toute densité confondue) est de 95 kg d'azote, 12 kg de phosphore, 38 kg de potassium (nettement sous évalué), 408 kg de calcium et 14 kg de magnésium.

Malgré les incertitudes on remarque les valeurs très élevées du prélèvement en N, P et Ca de ces peuplements. COLE (1986) dans sa compilation des données mondiales arrive pour les feuillus à un prélèvement moyen annuel de 70 kg de N, 6 kg de P, 48 k de K, 84 kg de Ca et 13 kg de Mg.

Les besoins totaux pour l'élaboration de la biomasse annuelle (écorce + bois + feuillus) — sans prendre en compte le système racinaire — sont beaucoup plus élevés que le prélèvement au sol dans la mesure où les transferts internes fournissent un flux important d'éléments. On peut évaluer simplement ces besoins en sommant les éléments oncorporés dans la production primaire nette aérienne (ligneuse et masse foliaire). On admettra en première approximation que l'accroissement de l'année a la composition de la découpe 1-4 (tableau V). On obtient pour ces besoins annuels totaux : 132 kg de N, 18 kg de P. 79 kg de K, 244 kg de Ca et 11 kg de Mg. On retrouve l'ordre de grandeur obtenu pour FRISON, 1969; GUILMONDI & DURANTI, 1974. Dans ces conditions, les transferts internes seraient de 37 kg de N, de 6 kg de P et 41 kg de K (surévalué).

Les besoins en bioéléments de cette culture sont très élevés et sans commune mesure avec leur disponibilité dans la majeure partie des sols forestiers. Les sols agricoles comme celui sur lequel cet essai est implanté, ont certes des réserves supérieures (*cf.* tableau II), ce qui n'exclut pas les apports de fertilisants (azote et phosphore en particulier).

Coût en élément nutritif de l'exploitation de biomasse dans les taillis à courte rotation

Les besoins élevés de ces peuplements se traduisent clairement au niveau du rendement des éléments utilisés par rapport à la biomasse produite.

Sur un plan pratique, la figure 3 illustre les relations entre exportation de biomasse et d'éléments nutritifs en fonction de l'intensité de la récolte. Il apparaît de façon très nette qu'il n'y a pas d'augmentation spectaculaire de l'exportation quand on passe d'une exploitation partielle à une exploitation totale de la biomasse produite (si on exclut toutefois les feuilles); l'allure des courbes témoigne d'une proportionnalité globale entre éléments exportés et biomasse récoltée.

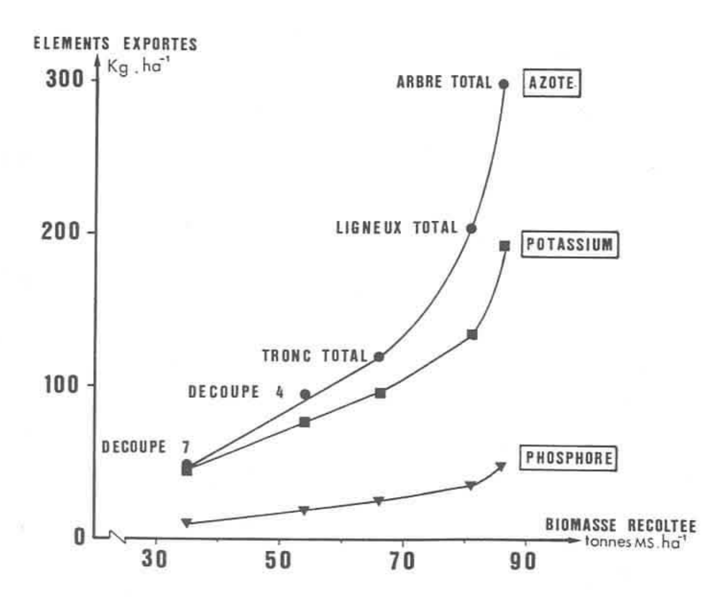


FIG. 3. — Liaison entre l'intensité de la récolte de la biomasse et l'exportation des éléments nutritifs majeurs.

Fig. 3. — Relationship between harvesting levels and the amount of nutrients removed.

Dans le taillis classique (BOUCHON *et al.*, 1985) le gradient de la minéralomasse est d'allure très différente avec une disproportionnalité plus importante entre biomasse et minéralomasse quand on cumule les compartiments de la découpe 7 jusqu'à l'arbre total (feuilles exclues). Ce résultat est à relier à l'âge élevé de l'exploitation des taillis classiques : le processus de vieillissement des organes y est beaucoup plus marqué et l'importance des écorces est plus faible.

IV. CONCLUSION

L'investigation dans des taillis de peuplier à courte rotation dans l'Est de la France permet d'apporter des données nouvelles sur les besoins nutritifs de ces peuplements, même si tous les paramètres nécessaires à l'établissement d'un véritable bilan d'éléments nutritifs n'ont pas été mesurés. En effet, le bilan de fertilité doit prendre en compte l'ensemble des entrées du système (fertilisation-apports externes éventuels) et les sorties (pertes par drainage et par exploitation de la biomasse).

Le clone Rochester de l'essai produit en moyenne 11,5 t de $MS.ha^{-1}.an^{-1}$, ce qui le classe actuellement à un bon niveau de production parmi les données bibliographiques disponibles. Il semble que ces chiffres puissent être assez largement dépassés avec de nouveaux clones.

Pour produire cette biomasse ligneuse, l'immobilisation moyenne annuelle est de l'ordre de 30 kg de N, 5,5 kg de P, 20 kg de K, 90 kg de Ca et 3,5 kg de Mg.

Le prélèvement moyen annuel au sol est quant à lui de 95 kg de N, 12 kg de P, 38 kg de K, 408 kg de Ca et 14 kg de Mg. Une partie de ces éléments est restituée par les litières et le pluviolessivage. Le turnover rapide des litières dans cette station fait qu'aucun blocage du cycle n'a lieu à ce niveau.

L'importance de l'immobilisation et du prélèvement au sol d'éléments nutritifs situe ces peuplements hors des normes de la foresterie classique tout spécialement pour N et P. L'utilisation d'essences feuillues à forte croissance juvénile, les rotations courtes, l'exploitation de la biomasse totale placent ces cultures en intermédiaire entre agriculture et foresterie classique et peu de sols forestiers sont susceptibles de soutenir ce flux annuel d'éléments nutritifs.

Dans cet essai, il est intéressant de voir l'influence de la densité d'ensouchement sur la production et l'immobilisation d'éléments minéraux. Au total, même si la tendance est à une légère perte de production dans les taillis les moins denses, la variabilité intra densité fait que rien de significatif n'apparaît.

La biomasse partielle à la découpe 7 ne montre pas non plus de différence significative entre les traitements, ce qui semble indiquer qu'à cet âge, les différences de surface terrière observées sur les densités 3 000 d'une part, 6 000 et 9 000 (non différentes entre elles) d'autre part, sont plus liées à la perte de production en petit bois qu'à un gain de production de bois de grosse dimension. C'est ce que l'histogramme de distribution des circonférences laissait supposer.

La minéralomasse varie de manière assez parallèle avec un effet modeste de la densité d'ensouchement qui se traduit par des valeurs légèrement plus fortes dans les fortes densités en liaison avec la dimension des produits (tiges de faible diamètre plus concentrées, ne serait-ce que par le rapport écorce/bois plus élevé).

Ces données sont importantes pour la pratique de la fertilisation, même s'il est nécessaire d'acquérir des données plus complètes sur les pertes par drainage et l'évolution de l'aptitude du système racinaire à utiliser les réserves existantes mais aussi les éventuels nouveaux apports.

ANNEXE I. — *Organigramme des opérations réalisées pour les évaluations des mesures de volume biomasse et minéralomasse des taillis de peuplier.*

Flow diagramm of the operations used to evaluate the biomass and nutrient content of the poplar coppices.

I. INVENTAIRE par traitement et répétition sur une placette d'une are.

Structure du peuplement

II. ÉCHANTILLONNAGE

Méthode statifiée proportionnelle par classe de C_{130}.
Arbres vivants : 10 arbres par traitement et répétition.
Arbres morts : 10 arbres pour l'ensemble des traitements.

COMPARTIMENTATION, MESURES ET PRÉLEVEMENTS (par arbre échantillonné)

(1) *Compartiments :*

- tronc : découpe 7, 4, 1 cm (séparation écorce et bois au laboratoire);
- branches vivantes : feuilles, rameaux (découpes 7 et 4 groupées avec tronc);
- branches mortes.

(2) *Mesures :*

Tronc :

- circonférences : C souche, C_{130}, C mi-hauteur;
- longueurs : totale et aux découpes (7, 4, 1 cm);
- poids total humide de chaque compartiment.

Branches vivantes :

- diamètre à 10 cm de l'insertion ($=D_{10}$) pour chaque branche.

Branches mortes :

- poids total par arbre.

(3) *Prélèvements :*

Tronc : 1 rondelle par mètre linéaire et par découpe;
Branches vivantes : 1 à 2 par arbre;
Branches mortes : 1 échantillon par arbre.

(4) *Au laboratoire :*

Séparation écorce et bois des rondelles de tronc, feuilles et bois des branches vivantes : mesure du taux d'humidité sur chaque échantillon.

Broyage et homogénéisation des échantillons destinés à l'analyse chimique.

III. CONSTRUCTION DES TARIFS (cubage, biomasse, minéralomasse).

Test de spécificité.

IV. ÉVALUATION A L'HECTARE : par application des tarifs à l'inventaire.

ANNEXE II. — *Biomasse et minéralomasse des taillis de peupliers « Rochester » âgés de 7 ans dans l'expérience de Drambon.*

ANNEX II. — Biomass and nutrient content of the coppices of the "Rochester" poplar (2nd rotation-7 years shoots).

		Densité = 3 000							Densité = 6 000						
		MS	N	P	K	Ca	Mg	Mn	MS	N	P	K	Ca	Mg	Mn
Feuilles		5,5	89,9	8,5	57,0	144,5	7,2	0,022	5,9	96,5	8,7	62,7	157,9	6,9	0,24
Bourgeons		0,3	3,4	0,5	1,5	4,7	0,4	0,002	0,4	3,6	0,6	1,6	5,0	0,4	0,002
Bois de branches vivantes		14,6	81,8	13,5	36,3	205,8	6,8	0,15	14,1	86,7	11,7	218,3	218,3	7,2	0,14
Branches mortes		0,2	0,5	0,1	0,2	2,6	0,1	0,002	0,3	0,8	0,1	0,3	4,2	0,1	0,003
Découpe 7	Écorce	5,3	32,1	5,3	23,8	149,3	3,7	0,16	4,8	28,7	4,6	20,1	137,5	3,4	0,14
	Bois	30,6	18,5	4,8	26,9	47,5	4,3	0,12	27,8	4,8	4,1	23,7	42,8	3,9	0,11
	Total	35,9	44,0	10,1	51,3	197,0	7,9	0,28	32,5	43,8	8,7	44,1	180,9	7,2	0,25
Découpe 4	Ecorce	9,0	57,2	9,2	38,1	255,7	6,5	0,30	9,1	64,1	10,1	40,7	296,6	7,5	0,23
	Bois	46,8	30,2	8,3	36,6	78,6	6,0	0,19	48,3	14,7	9,1	38,7	81,9	5,8	0,19
	Total	55,9	87,9	17,6	75,4	334,2	12,8	0,49	57,5	75,4	19,2	80,0	352,4	13,1	0,52
Tronc total	Ecorce	10,7	72,4	11,5	44,8	305,9	7,9	0,32	11,2	81,0	13,4	50,4	344,1	0,5	0,28
	Bois	52,6	36,3	9,6	38,9	87,2	6,5	0,21	54,2	22,4	10,9	44,5	95,1	6,9	0,22
	Total	63,4	108,7	21,3	87,2	392,3	14,9	0,53	66,5	103,7	24,4	97,2	440,4	16,2	0,50
Arbre total ligneux vivant (1)		78,3	196,7	34,0	124,8	615,4	22,2	0,68	80,7	189,3	38,2	131,3	656,4	23,3	0,64
Arbre mort sur pied (2)		2,8	6,5	0,5	1,6	24,6	0,8	0,40	4,5	9,6	0,8	2,5	36,6	1,3	0,63
TOTAL ligneux sur pied (1+2+3)		81,3	203,7	34,6	126,6	642,6	23,1	1,08	85,5	199,7	39,1	134,1	697,2	24,7	1,27

		Densité = 9 000						
		MS	N	P	K	Ca	Mg	Mn
Feuilles		5,9	98,9	15,5	63,9	161,2	6,9	0,41
Bourgeons		0,4	3,8	0,6	1,7	5,3	0,4	0,003
Bois de branches vivantes		14,5	89,1	15,3	39,3	224,2	7,4	0,15
Branches mortes		0,3	0,8	0,1	0,3	4,4	0,1	0,003
Découpe 7	Écorce	5,7	31,2	5,0	22,5	149,7	3,7	0,11
	Bois	30,7	29,7	4,6	26,3	47,4	4,2	0,92
	Total	36,4	47,9	9,6	49,4	197,6	7,9	1,03
Découpe 4	Ecorce	9,8	65,5	10,4	42,1	276,6	7,6	0,20
	Bois	49,9	49,3	9,4	40,2	79,9	10,0	1,50
	Total	50,7	118,4	19,7	83,0	350,9	17,3	1,70
Tronc total	Ecorce	12,1	86,0	13,5	51,2	332,4	9,6	0,24
	Bois	57,2	59,3	11,1	52,3	87,2	11,4	1,71
	Total	69,4	145,9	24,7	98,9	419,3	20,5	1,95
Arbre total ligneux vivant (1)		83,4	227,2	38,8	140,5	624,6	27,3	2,10
Arbre mort sur pied (2)		4,7	10,2	0,9	2,7	38,6	1,42	0,66
TOTAL ligneux sur pied (1+2+3)		88,4	238,2	39,8	143,5	667,6	28,8	2,76

(*) Évaluation à partir des teneurs moyennes.

BIBLIOGRAPHIE

AFOCEL, 1982. — Culture de biomasse ligneuse-taillis à courte rotation, 1 vol., 214 p.

ANDERSON H. W. & ZSUFFA L., 1975. — The yield and wood quality of Euramerican poplar grown in two year rotation. Inter-Poplar Comm. 15th session, Rome, dec. 1975, 8 p.

BACHACOU J., MASSON J. P. & MILLIER L., 1981. — Manuel de la programmathèque statistique. Amance 1981. I.N.R.A., Dept. de Biométrie 1 vol., 516 p.

BAKER J. B. & BLACKMON B., 1977. — Biomass and nutrient accumulation in a cottonwood plantation. The first growing season. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41, 632-636.

BASKERVILLE G. L., 1972. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Can. J. For.* 2, 49.

BERNIER B., 1984. Nutrient cycling in *Populus*. A litterature review with implication in intensively-managed plantations. I.E.A./F.E. Program Groupe B Biomass growth and production. 46 p.

BONDUELLE P., 1977. Premiers résultats sylvicoles et papetiers d'un taillis de peuplier. *Annales AFOCEL*, p. 297-358.

BONDUELLE P., 1983. — Taillis de peupliers à courtes rotations. *Annales AFOCEL*, p. 375-401.

BONNEAU M., 1978. — L'analyse foliaire. *La Forêt Privée*, janv.-fév. 1978, p. 31-33.

BONNEAU M., 1986. — Fertilisation à la plantation. *R.F.F.* XXXVIII, 3, p. 293-300.

BOUCHON J., NYS C. & RANGER J., 1985. — Cubage, biomasse et minéralomasse : comparaison de trois taillis simples des Ardennes primaires. Acta Oecologica, *Oecol. Plant.*, Vol. 6 (20), n° 1, p. 53-72.

COLE D. W. & RAPP M., 1980. — Elemental cycling in forest ecosystem. In Dynamic properties of forest ecosystem. DE REICHLE éd., Cambridge Univers. Press. p. 341-409.

COLE D. W., 1986. — Nutrient cycling in world forests. In Forest site and productivity, Gessel Ed. Martinus Nijhoff Publ.

CPCS, 1967. — Classification française des sols. Document diffusé par l'E.N.S.A., Grignon, France

DAGNELIE P., 1973. — Théorie et méthodes des statistiques. 2 vol. Presses Agron. de Gembloux, Distrib. Wander S.A.

DEB B. C., 1959. — The estimation of free ion oxide in soils and clays and their removal. *J. of Soil Sci.*, I, p. 212.

DROUINEAU G., 1942. — Dosage du calcium actif. *Ann. Agron.*, p. 441.

DUCHAUFOUR Ph., 1970. — Précis de pédalogie. Masson éd., Paris.

FRISON G., 1969. — Alcuni aspetti della nutrizione del pioppo in vivaio : produzione in sotanza secca ed assorbimento di sostanze nutritizile. *Cellulosa e Carta*, 20, p. 28-34.

FUJIMORI T., 1981. — Intensitive techniques for Cryptomeria and Chamaecyparis in Japan. Congrès I.U.F.R.O., Tokyo, p. 403-412.

GARBAYE J., 1980. — Nutrition minérale et production du peuplier Robusta et I 213 en populiculture traditionnelle dans le Nord du Bassin Parisien. *Ann. Sci. For.*, 37 (2), p. 159-172.

GEYER W. A., 1981. — Growth, yield and woody biomass characteristics of seven short rotation hardwoods. *Wood Science*, Vol. 13 (4), p. 209-215.

GUILIMORI G. & DURANTI G., 1974. — Ritmo d'incremento in sotanza secca e di utilizzazione in elementi nutritivi del pioppo in vivaio duranti il second anno. *Cellulosa i carta* 25, p. 3-20.

HANSEN E. A. & BAKER J. B., 1977. — Biomass and nutrient removal in short rotation intensively cultured plantations. In Proceedings of Symposium "Impact of intensive harvesting in forest nutrient cycling" School of forestry Un. of N.Y. Syracuse.

HERRICK A. M. & BROWN C. L., 1967. — A new concept in cellulose production silage sycamore. *Agricultural Sci. Review*. Vol. 5, n° 4, p. 8-13.

KORSMO H., 1983. — Can energy plantation become balanced ecosystems? IEA/FE PG'B' Biomass and production program. Report n° 8, 40 p.

JORET G. & HEBERT J., 1955. — Contribution à la détermination du besoin du sol en acide phosphorique. *Ann. Agro.* (2), p. 233-299.

MAKKÖNEN O., 1975. — Puiden Lyhytkiertoviljelyn Varhaistoriaa. *Silva Fennica*, (9), 3, p. 23.

MANCIER C., 1985. — Biomasse et minéralomasse des taillis de châtaigniers (bois et feuilles des branches). Doc. int. I.N.R.A., Station des Sols Forestiers, Ivol., 27 p + fig. + annexes.

MARQUESTAUT J., 1981. — État actuel des connaissances sur le taillis à courtes rotations. Proceeding Congres I.U.F.R.O. Tokyo, 1981.

MILLER H. G., 1984. — Dynamics nutrient cycling in plantation ecosystems. In Nutrition of plantation forests. Academics Press London, p. 53-78.

MILLIER C., NYS C. & RANGER J., 1986. L'échantillonnage dans l'étude de la minéralomasse forestière : l'exemple des taillis ardennais. *Ann. Sci. For.*, 43 (2), p. 165-178.

NILSSON P. O. & ZSUFFA L., 1983. Short rotation forest biomass. Production technology and mechanization. Proceedings of a I.E.A. Forestry Energy Programm Workshop, oct. 82, Vettre, Norway.

PARDE J., 1961. — Dendrométrie. E.N.G.R.E.F., Nancy.

RAISON R. S. & CRANE W. J. B., 1981. — Nutritionnal costs of shortened rotations in plantation forestry. Congrès I.U.F.R.O. Tokyo, 1981, p. 63-72.

RANGER J., 1978. — Recherches sur les biomasses comparées deux plantations de Pin lacirio de Corse avec ou sans fertilisation. *Ann. Sci. For.*, 35, n° 2, p. 93-115.

RANGER J. & BONNEAU M., 1984. — Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêts. I. Le cycle biologique. *R.F.F.*, Vol. XXXVI, n° 2, p. 93-112.

RANGER J., NYS C. & RANGER D., 1981. — Étude comparative de deux écosystèmes forestiers feuillus et résineux des Ardennes primaires françaises. I. Biomasse aérienne du T.S.F., *Ann. Sci. For.*, 38 (2), p. 259-282.

RANGER J., BARNEOUD C. & NYS C., 1987. — Production et exportation d'éléments nutritifs de taillis de peuplier à courte rotation. *Annales AFOCEL* (à paraître).

SAARSALMI A. & PALMAREN K., 1984. — Biomass production and nutrient requirements of a young grey alder plantation. *Bioenergy* 84, Vol. II, Biomass Ressources, ed. Hegnens, A. Ellegard, p. 110-113.

SHELTON M. G., SWITZER G. L., NELSON L. E., BAKER L. E. & MUELLER C. W., 1982. — The development of cottonwood plantations on alluvial soils: dimensions, volume, phytomass, nutrient content and other characteristics. *Agr. For. Exp. Stat. Techni. Bull.* 113, Mississipi States MS, 43 p.

ULRICH B., 1973. — Influence de la fertilisation sur le cycle des éléments nutritifs dans les écosystèmes forestiers. F.A.O./I.U.F.R.O., Symposium « Fertilisation en forêt », Paris, p. 23-33.

WALKLEY A. & BLACK A., 1934. — An examination of the Degtareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37, p. 29-38.

WOOD B. W., WITWER R. F. & CARPENTER S. B., 1977. Nutrient element accumulation and distribution in an intensively cultived American Sycarmore plantation. *Plant and Soil*, 48, p. 417-433.